

Grüne Welle für den Laser

Mobile elektronische Geräte werden immer kleiner. Dennoch sollen sie großformatige Bilder erzeugen. Dafür sollen zukünftig Miniatur-Laserprojektoren sorgen. Bislang fehlte dazu jedoch eine entscheidende Voraussetzung: ein echter grüner Laser. Jetzt haben deutsche Forscher den Durchbruch geschafft – exklusiv in »Spektrum« berichten sie, wie es ihnen gelang.

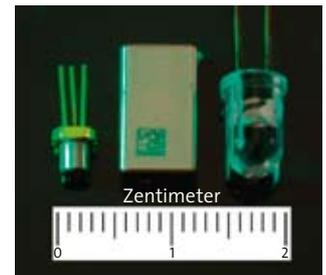
Von Désirée Queren, Adrian Avramescu und Stephan Lutgen

Nach einem Jahrhundert hat die klassische Glühbirne als Leuchtmittel mittlerweile ausgedient und wird derzeit europaweit durch kompakte Leuchtstofflampen ersetzt. Doch diese Energiesparlampen sind wegen ihres Gehalts an umweltschädlichem Quecksilber und des unausgewogenen Lichtspektrums umstritten. Es zeichnet sich bereits ab, dass die noch viel effizientere Lichtproduktion aus Halbleiterkristallen sie schon bald vom Markt verdrängen wird. Heute sind Licht emittierende Dioden, kurz LEDs, aus vielen Anwendungen im Alltag nicht mehr wegzudenken. Jetzt beginnen Leuchtdioden die Lichtindustrie auf Grund ihres geringeren Stromverbrauchs und der langen Lebensdauer zu revolutionieren.

LEDs beruhen auf Halbleiterkristallen, die beispielsweise aus Verbindungen von Aluminium, Gallium und Indium mit Stickstoff oder von Aluminium, Gallium und Arsen mit Phosphor bestehen. Sie senden je nach Materialzusammensetzung Licht unterschiedlicher Wellenlängen aus, vom infraroten über den sichtbaren bis in den ultravioletten Spektralbereich. Anorganische Leuchtdioden treten heute als farbige Lichtquellen in vielen Anwendungen auf, beispielsweise als Scheinwerfer, Rücklicht und Tagfahrlicht im Auto, für die Armaturanzeigen im Auto, in Mobiltelefonen oder Displays.

Doch nicht nur für Beleuchtungszwecke sind Energie sparende Halbleiterlichtquellen das Mittel der Wahl. Ein wichti-

Eine direkt grün emittierende Laserdiode (links) ist effizienter sowie kleiner als ein frequenzverdoppelter Infrarotlaser (Mitte) und eine radial emittierende Leuchtdiode (rechts).



ger gesellschaftlicher Trend strebt nach immer mehr Mobilität bei gleichzeitiger optimierter Bildqualität; damit steigt die Nachfrage nach miniaturisierten Endgeräten wie Smartphones und Tablets, die dennoch große, detailreiche Bilder bieten sollen. Aber wie soll das funktionieren? Die zunehmende Leistungsfähigkeit mobiler Elektronik erlaubt zwar das Aufnehmen und Übertragen von hochauflösenden Digitalfotos und Videos, aber der Zuwachs an Mobilität geht automatisch mit schrumpfenden Displays einher, wenn die Bildgröße und Auflösung von den Maßen des Mobiltelefons bestimmt wird. Für dieses Dilemma zeichnet sich nun eine Lösung in Gestalt hochintegrierter Halbleiterprojektoren ab, die künftig große, fein aufgelöste Bilder liefern werden.

Solche so genannten Pikoprojektoren sind so winzig, dass sie sich ohne Weiteres in Smartphones, Laptops und Digitalkameras einbauen lassen. Zwar könnten theoretisch dabei LEDs als Lichtquellen dienen – doch sie stoßen an Grenzen, wenn es um möglichst geringe Projektorgröße, hohe Auflösung und Effizienz geht. In dieser Hinsicht punkten Halbleiterlaser gegenüber LEDs mit höherer Strahlqualität und Leistungsdichte; außerdem ermöglichen Laser mit ihrem schmalen Emissionsspektrum eine naturgetreuere Wiedergabe von Farben. Wenn man die Strahlen dreier Laser in den Farben Rot, Grün und Blau kombiniert, lässt sich fast der ganze für das menschliche Auge wahrnehmbare Farbraum darstellen.

Wie erzeugt ein Pikoprojektor seine Bilder? Ein winziger, in zwei zueinander senkrechten Achsen beweglicher Mikrospiegel schreibt mit dem Laserstrahl zeilenweise das Bild auf die Projektionsfläche. Wegen der einzigartigen Strahleigenschaften von Lasern ist eine Projektion auf beliebig

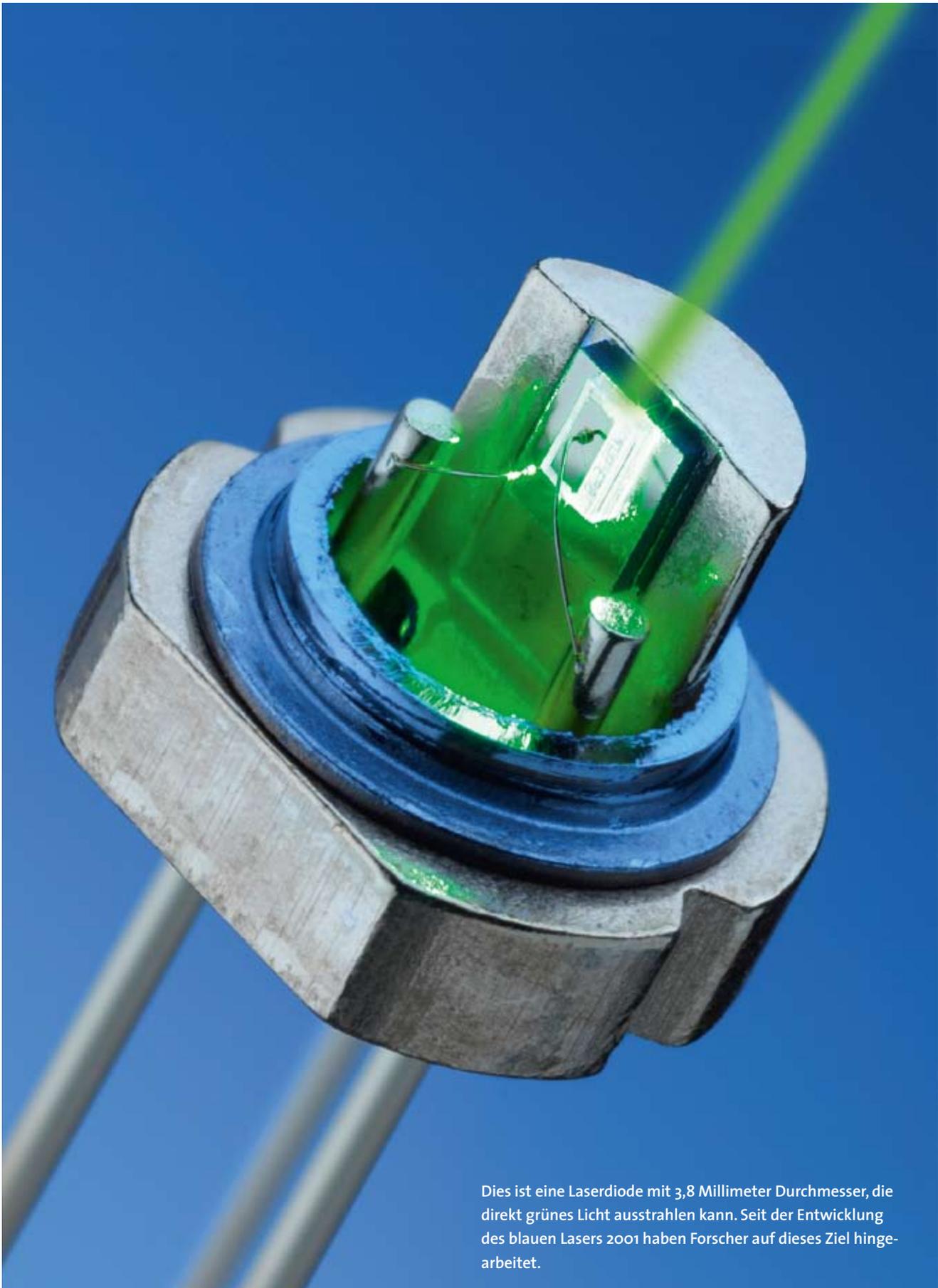
AUF EINEN BLICK

JAGD NACH GRÜNEM LASERLICHT

1 **Pikoprojektoren** sollen demnächst das Betrachten großer Bilder mit kleinen Geräten – beispielsweise Smartphones – ermöglichen. Dafür sind Halbleiterlaser in den drei Grundfarben Rot, Grün und Blau nötig.

2 Erst seit Neuestem gelingt es mit **aufwändig kontrollierten Epitaxieverfahren**, auch grün emittierende Laserstrukturen zu erzeugen.

3 Mit diesen winzigen Farbprojektoren lassen sich demnächst **lebensgroße Bilder und Filme** an Wohnzimmerwände werfen.



ALLE ABBILDUNGEN DES ARTIKELS: OSRAM OPTO SEMICONDUCTORS

Dies ist eine Laserdiode mit 3,8 Millimeter Durchmesser, die direkt grünes Licht ausstrahlen kann. Seit der Entwicklung des blauen Lasers 2001 haben Forscher auf dieses Ziel hingearbeitet.

gekrümmte Flächen mit großer Tiefenschärfe möglich – ohne dass wie bei konventionellen Projektoren eine spezielle Optik zur Fokussierung nötig wäre.

Satte und scharfe Farbbilder erfordern drei Laser in Rot, Blau und Grün. Das Problem dabei: Bislang sind erst rote und blaue Laser routinemäßig herstellbar. Erste kommerziell verfügbare, nur wenige Kubikzentimeter große Laserprojektoren kombinieren die Strahlen von roten und blauen Laserdioden mit Infrarotlasern, die durch Frequenzverdopplung grünes Licht liefern. Doch frequenzverdoppelte Laser haben im Vergleich zu direkt grün emittierenden Laserdioden entscheidende Nachteile: Sie sind teurer, liefern schlechtere Bildqualität und sind vor allem deutlich größer als direkte grüne Laserdioden aus Indiumgalliumnitrid (InGaN).

Problematische Kristallqualität

Nur ist es leider nicht einfach, InGaN-Laserdioden herzustellen, die grünes Licht emittieren; das gelang erst 2009. Seitdem liefern sich mehrere Forschungs- und Universitätseinrichtungen ein rasantes Kopf-an-Kopf-Rennen mit dem Ziel, die Performance und Prozessstabilität des grünen Lasers großserientauglich zu machen. Sie müssen dabei mehrere Hürden überwinden.

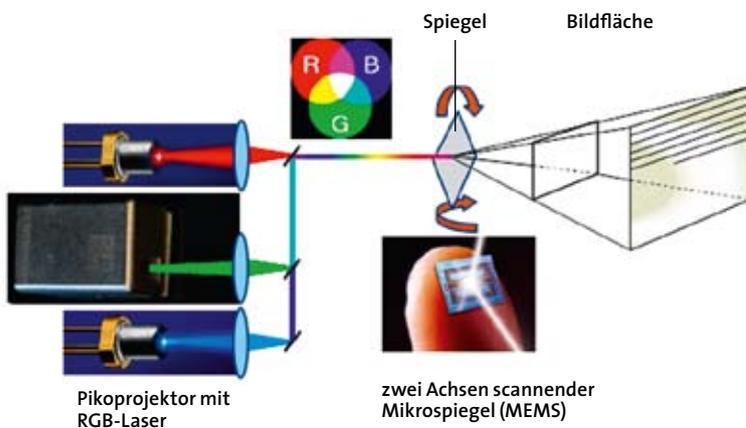
Blaue und grüne LEDs sowie blaue Laserdioden werden durch die so genannte Epitaxie, eine besondere Form der schichtweisen Kristallabscheidung, hergestellt. Das geschieht in speziellen Reaktoren durch Gasphasenabscheidung von vielen perfekt einkristallinen Halbleiterschichten aus Alu-

minium- oder Indiumgalliumnitrid (siehe Kasten rechts unten).

Um mit diesen Materialien einen grünen Laser zu konstruieren, muss der Indiumgehalt in den Licht aussendenden InGaN-Schichten im Vergleich zum blauen Laser erhöht werden. Doch die veränderte Materialzusammensetzung beeinflusst leider nicht nur die emittierte Wellenlänge, also die Farbe des Lichts, sondern gleichzeitig auch drastisch die Gitteranordnung der Atome im Kristall. Die Ursache hierfür liegt in den unterschiedlichen Eigenschaften von Indium- und Galliumatomen.

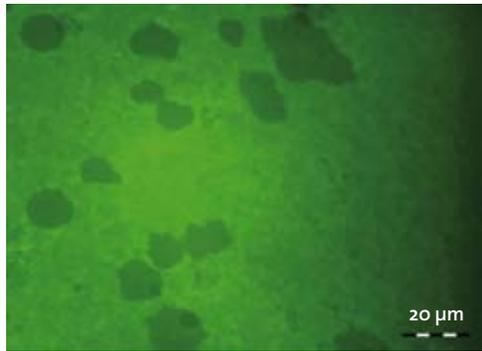
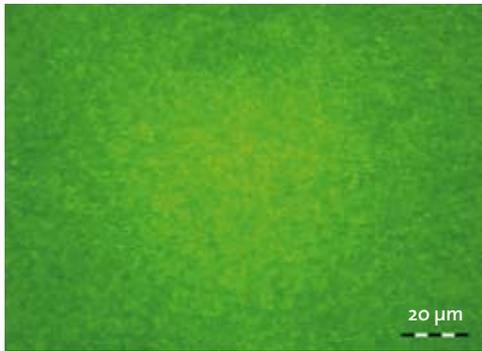
Beim Erhöhen des Indiumanteils im Kristall werden Galliumatome durch Indiumatome auf gleichwertigen Gitterplätzen ersetzt. Indium liegt aber in einer anderen Stelle im Periodensystem der Elemente als Gallium; seine Atome sind daher größer und weisen andere Bindungsverhältnisse auf. Das erschwert den Einbau zusätzlichen Indiums, denn die indiumhaltigen Schichten auf den GaN-Substraten stehen unter Spannung. Wird diese allzu groß, setzen so genannte Relaxationsprozesse die gespeicherte Energie im Kristall frei, was zu Versetzungen – eindimensionalen Kristalldefekten – führt.

Um dennoch einen möglichst regelmäßigen Indiumeinbau in das GaN-Kristallgitter zu erreichen, muss die Abscheidung unter speziellen Wachstumsbedingungen ablaufen – die aber wiederum ihrerseits die Kristallqualität verschlechtern. Beispielsweise muss man die Abscheidetemperatur der Substratoberfläche deutlich reduzieren, da sonst das zu-



Ein heutiger Pikoprojektor kombiniert drei Laserstrahlen in den Farben Rot, Grün und Blau. Ein winziger um zwei Achsen drehbarer Spiegel erzeugt daraus zeilenweise farbige Bilder. Die Schemaskizze (links) zeigt zwischen der roten und blauen Laserdiode ein signifikant größeres Gehäuse für den grünen Strahl. Darin verbirgt sich ein Infrarotlaser, dessen Strahlung nach bisheriger Technik erst durch Frequenzverdopplung in grünes Licht verwandelt wird. Ein echter grüner Laser erlaubt, deutlich kleinere Projektoren herzustellen. Laserprojektoren erreichen ohne zusätzliche Optik sehr gute Tiefenschärfe – selbst auf gekrümmten Projektionsflächen (rechts).





In der Fotolumineszenzaufnahme tauchen in der grün emittierenden Halbleiterschicht (links) nach thermischer Behandlung defekte Bereiche im Material auf (rechts).

nächst an der Oberfläche angelagerte Indium wieder freiwürde. Doch die niedrigere Temperatur hemmt die Beweglichkeit der angelagerten Atome auf der Oberfläche; das begünstigt Punktdefekte und ungleichmäßiges Wachstum. Auf diese Weise werden viele unterschiedliche Defekte in den Kristall eingebaut.

Als unser Team bei der Firma Osram Opto Semiconductors daranging, grüne Laserdioden zu entwickeln, war dies eines der ersten Probleme, die es zu lösen galt. In Fotolumineszenzaufnahmen erscheinen defektreiche, rund 20 Mikrometer (tausendstel Millimeter) große Regionen als dunkle Flecken (siehe Bild oben rechts). Die Defektbereiche produzieren bei optischer Anregung kein Licht und erscheinen daher dunkel gegenüber den Bereichen mit guter Kristallqualität, die grünes Licht emittieren. Da die fehlerhaften Gebiete nicht nur kein Licht aussenden, sondern es sogar absorbie-

ren, verhindern solche Strukturen die Funktion von Laserdioden. Nachdem wir diese Defekte durch eine geeignete Schichtstruktur und optimierte Wachstumsbedingungen vermeiden konnten, stellten wir fest, dass auch auf kleinerer Skala, in der Größenordnung von 500 Nanometern (millionstel Millimetern), so genannte Indium-Gallium-Fluktuationen auftreten.

Hilfreiche piezoelektrische Effekte

Mit dem so genannten Transmissionselektronenmikroskop fanden wir sogar noch winzigere Defekte (um zehn Nanometer, siehe Abbildung S. 82 oben). Nur mit derart aufwändigen Nachweismethoden lassen sich feinste Defekte aufspüren, um anschließend die Kristallwachstumsbedingungen optimieren und eine annähernd perfekte Kristallanordnung erreichen zu können.

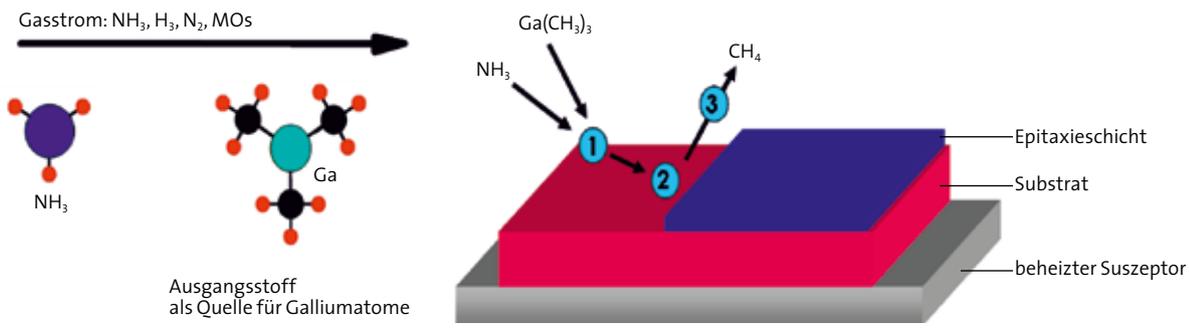
Die raffinierte Züchtung von Kristallschichten

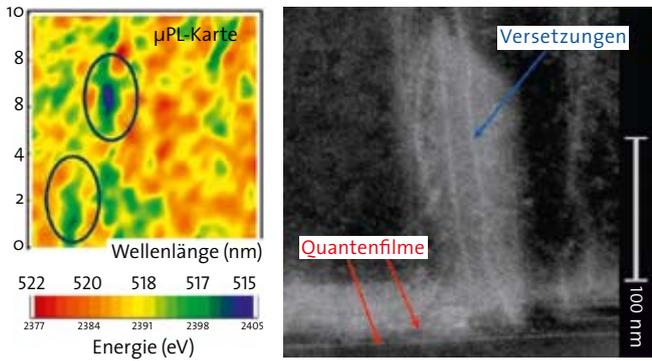
Der geordnete Abscheidungsprozess auf einem vorgegebenen Substrat wird Epitaxie genannt (von griechisch *epi* für »auf« und *taxis* für »Richtung«). Das Substrat prägt dabei seine Kristallstruktur der Atomanordnung in den abgeschiedenen Schichten auf.

Will man beispielsweise dünne Schichten von Galliumnitrid (GaN) erzeugen, so dienen als Ausgangsstoffe eine metallorganische Galliumverbindung, etwa Trimethylgallium, sowie Ammoniak (NH₃) als Quelle für Stickstoff. Beide Substanzen werden getrennt voneinander mit Hilfe von Trägergasen auf das

beheizte Substrat gebracht. An der Grenzfläche zum GaN-Substrat läuft bei geeigneten Temperaturen und Reaktordruck die chemische Reaktion zur Bildung von GaN ab:

Die Trägergase lassen die Ausgangsstoffe erst auf dem Substrat miteinander reagieren, so dass sie sich nur dort abscheiden. Auf diese Weise bildet sich unter geeigneten Bedingungen eine kontinuierliche Schicht.





Die Kristallqualität ist nicht die einzige Herausforderung, die es bei der Entwicklung von grünen Laserdioden zu lösen gilt. Halbleiterverbindungen der Elemente Gallium, Indium und Stickstoff kristallisieren in Form der »Wurtzit-Struktur«, deren Elementarzelle eine hexagonale Basis besitzt. Werden nun auf Grund von Spannungen in der Kristallstruktur – die bei dünnen, Licht emittierenden InGaN-Schichten leicht entstehen – Atome in der Elementarzelle ein wenig verschoben, so ändern sich die physikalischen Eigenschaften deutlich.

Tiefe Einblicke in eine grün emittierende Kristallschicht: Die Fotolumineszenz- und Transmissionselektronenmikroskopie enthüllt noch die feinsten Defekte (links: Ovale; rechts: blaue Pfeile). Sie müssen vermieden werden, wenn der grüne Laser seine volle Leistung erbringen soll.

Die Ladungen in der Elementarzelle geraten aus dem Gleichgewicht, und an dem Kristall entstehen auf Grund des piezoelektrischen Effekts elektrische Felder (Kasten unten).

Der Effekt ist an sich für grüne Laserdioden und Leuchtdioden erwünscht. Das elektrische Feld verändert die quantenmechanischen Energiezustände an den Grenzflächen der einzelnen Schichten – und somit die Wellenlänge des emittierten Lichts. Leuchtdioden, die bei niedrigen Stromdichten betrieben werden, gelangen dank dieses Effekts zu langwelligerem grünem Licht. Doch Laserdioden erfordern viel höhere Stromdichten, um die stimulierte Emission zu erreichen. Hohe Stromdichte bedeutet zugleich hohe Ladungsträgerdichte – und die schirmt das durch den piezoelektrischen Effekt erzeugte elektrische Feld teilweise ab. Das verschiebt die

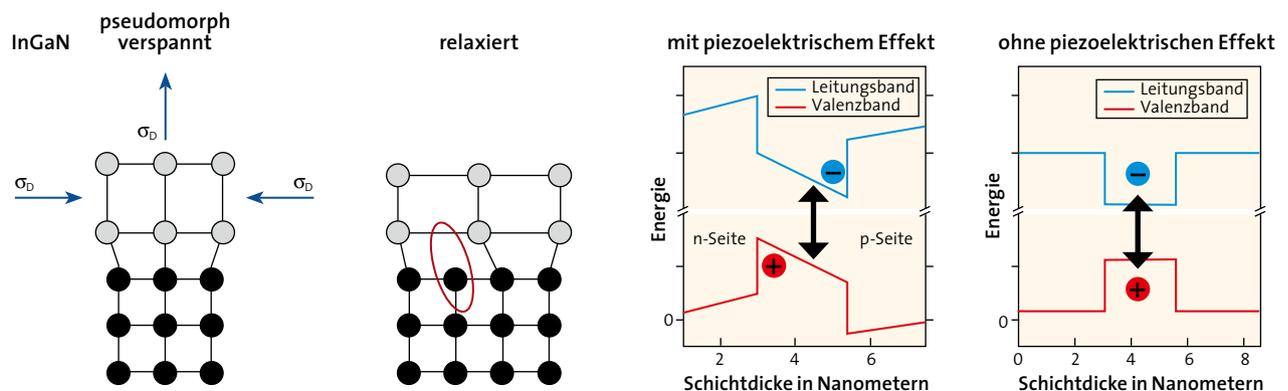
Indiumgalliumnitrid-Schichten unter Spannung

Die Licht emittierenden Schichten in Leucht- und Laserdioden sind extrem dünn – nur wenige Nanometer – und bestehen aus Indiumgalliumnitrid (InGaN). Sie werden per Epitaxie (siehe Kasten S. 81) auf Substraten aus Galliumnitrid (GaN) abgeschieden. Um InGaN-Schichten zu erzeugen, müssen im GaN Galliumatome durch Indiumatome ersetzt werden.

Da die Indiumatome andere Eigenschaften aufweisen als die Galliumatome, verändert ihr Einbau die Kristallstruktur. Insbesondere hat InGaN eine größere Gitterkonstante als GaN – es beansprucht sozusagen mehr Platz. Aus diesem Grund stehen die auf GaN-Substrate aufgebrachtene InGaN-Schichten unter mechanischer Spannung. Solange die Schichtdicke der InGaN-Schicht klein bleibt, übernimmt sie die Kristallstruktur des Substrats, wenn auch leicht deformiert: Die Schicht ist

»pseudomorph verspannt« (Grafik ganz links). Doch wenn die Schichtdicke zu groß wird, entlädt sich die gespeicherte Verspannungsenergie durch Relaxationsprozesse, und es bilden sich störende Versetzungen im Kristall (Grafik rechts daneben).

Eine pseudomorphe Verspannung verändert die Eigenschaften der Licht emittierenden Schicht. Im InGaN-Materialsystem treten piezoelektrische Effekte auf, das heißt, die mechanische Verspannung erzeugt ein elektrisches Feld. Es verbiegt quasi die Energiebänder der Elektronen im Kristall und verändert damit die Übergangsenergie – und somit auch die Emissionswellenlänge (rechte Grafiken). Diese Effekte sind erwünscht, um das erzeugte Licht zum Langwelligeren zu verschieben und so aus einem blauen Laser einen grünen zu machen, ohne dass der Indiumanteil im gleichen Verhältnis erhöht werden muss.



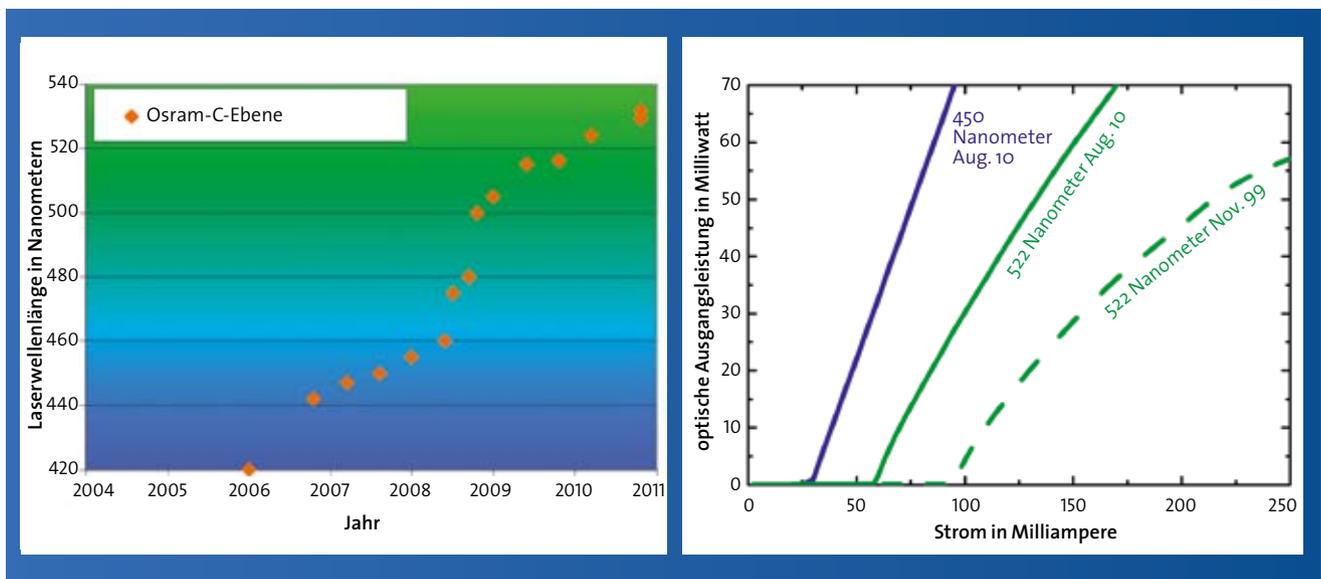
An Problemen interessiert uns vor allem eines: ihre Lösung.

Wer ein Problem nicht versteht, kann es auch nicht lösen. Deshalb bietet FOCUS gründliche Analysen, geht Ursachen auf den Grund und bewertet Konsequenzen. Aber dabei verlieren wir nie das eigentliche Ziel aus den Augen. Schließlich interessiert Sie doch in erster Linie, wer das Problem wie aus der Welt schaffen könnte. Welche Alternativen es gibt. Und was das für Sie bedeutet.

Entscheiden Sie sich für Klarheit: Lesen Sie den neuen FOCUS.



FOCUS



Im letzten Jahrzehnt haben sich die grünen Laserdioden bei Osram Opto Semiconductors rasant entwickelt (links). Jüngst hat sich eine wichtige charakteristische Größe, der so genannte Schwellstrom, immer besser an den erstrebten Vergleichswert für blaue Laser angenähert (rechts).

Emissionswellenlänge deutlich weniger stark ins Langwellige, weshalb eine Laserdiode im Vergleich zu LEDs wesentlich mehr Indium im Kristall benötigt, um eine grüne Emission zu erreichen. Aus diesem Grund sind grüne LEDs bereits seit Langem verfügbar, aber keine grünen Laserdioden.

Grünes Licht am Ende des Tunnels

Durch weiteres Optimieren der Wachstumsbedingungen und des Strukturaufbaus ist es den Forschern bei Osram Opto Semiconductors dennoch gelungen, die Kristallqualität zu verbessern und die Emissionswellenlänge der Laserdioden schrittweise in den langwelligeren Bereich zu verschieben (siehe Grafik oben links). Die ersten grünen Laserdioden taugten allerdings noch nicht zur Pikoprojektion. Dafür war eine signifikante Verbesserung der elektrooptischen Leistung nötig. Mit ersten grünen Laserdioden konnten erfolgreich Prototypen von mobilen Laserprojektoren demonstriert werden. Für ein marktfähiges Produkt ist eine Verbesserung der elektrooptischen Kenngrößen nötig. Messbar ist diese Verbesserung an der Kenngröße von Laserdioden, dem so genannten Schwellstrom. Er bezeichnet den Strom, bei dem der Laserbetrieb einsetzt und alle Verlustmechanismen unterdrückt sind.

Derzeit nähern sich die Schwellströme der grünen Laser denen der blau emittierenden Laserdioden immer mehr an (Grafik oben rechts). Außerdem ist für die Pikoprojektion eine ausreichend hohe optische Ausgangsleistung nötig – doch auch diese Bedingung wird von den neuesten grünen Laserdioden bereits erfüllt. Damit ist nun endlich der Weg frei für winzige, leistungsstarke Farbprojektoren, mit denen künftig ein Smartphone lebensgroße Bilder und Filme an jede Wohnzimmerwand zu werfen vermag. ~

DIE AUTOREN



Désirée Queren (Mitte) studierte Werkstoffwissenschaften an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg und schrieb ihre Doktorarbeit im Bereich der

Epitaxie von grünen Laserdioden bei Osram Opto Semiconductors. Heute ist sie weiterhin im Bereich von InGaN-LEDs dort tätig. **Adrian Avramescu** (rechts) arbeitet seit vielen Jahren in dieser Firma auf dem gleichen Gebiet und ist heute Epitaxie-Experte für die InGaN-Laser. Nach seinem Physikstudium an der Universität Bukarest in Rumänien sowie der Promotion an der Universität Hokkaido war er Gastwissenschaftler unter anderem am Riken-Institut in Wakoshi, Japan. **Stephan Lutgen** (links) war nach seinem Physikstudium an der Philipps-Universität in Marburg und der Promotion an der Humboldt-Universität zu Berlin in verschiedenen Funktionen bei Osram Opto Semiconductors tätig und leitete dort zuletzt die InGaN-Laserentwicklung. Für seine Arbeiten erhielt das Team 2010 den Karl-Heinz-Beckurts-Preis.

QUELLEN

- Lutgen, S. et al.:** Grüne Laser erobern die Laserprojektion. In: Photonik 43, S. 56, 2011
- Lutgen, S. et al.:** Recent Results of Blue and Green InGaN Laser Diodes for Laser Projection. In: Proceedings of SPIE 7953, S. 79530G1–12, 2011
- Schwarz, U.T., Scholz, F.:** Rosige Aussichten für grünes Licht. In: Physik Journal 10, S. 21, 2011

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1124687